

江琪,桂海林,花丛,等,2022.济南市大气污染天气分型与冷空气对污染物的影响机制研究[J].气象,48(10):1281-1291. Jiang Q,Gui H L,Hua C,et al,2022. Influence mechanisms and weather patterns of air pollution episodes in Jinan[J]. Meteor Mon, 48(10):1281-1291(in Chinese).

济南市大气污染天气分型与冷空气 对污染物的影响机制研究^{*}

江 琪^{1,2} 桂海林¹ 花 丛¹ 张碧辉¹ 徐 冉¹ 何佳宝³ 吕梦瑶^{1,2}

1 国家气象中心,北京 100081

2 南京气象科技创新研究院/中国气象局交通气象重点开放实验室,南京 210041

3 宁波市环境监测中心,宁波 315012

提 要:对济南市大气污染与气象要素以及高低空天气系统配置的相关关系进行研究,形成大气污染的天气学概念模型,并探讨不同强度冷空气过程对济南市大气污染物的生消作用。主要结论为:2016—2018 年,济南市 75% 以上的 PM_{2.5} 污染日出现在地面均压场中。在天气类型出现概率均等的前提下,污染天气出现概率最高的地面天气类型为倒槽型(>55%),其次为均压场型(26.8%)。500 hPa 为脊区控制型、平直西风带型、反气旋型、槽后型和槽前型时,均有>25% 的概率出现 PM_{2.5} 污染。济南市 PM_{2.5} 污染概率最大(>50%)的高低空配置为地面倒槽配合高空槽后型,其次为倒槽配合平直西风带型以及均压场配合槽后型。平均情况下,PM_{2.5} 污染时混合层高度低于 1000 m,达到重度污染时小于 800 m。污染时段相对湿度均值分布在 65%±20%,温度均值为 6℃±1℃。不同强度冷空气对污染物影响复杂,较强冷空气($\Delta T_{24\text{ h}} > 4.3^\circ\text{C}$, $\Delta p_{24\text{ h}} > 4.74\text{ hPa}$)持续一定的时长(>3.5 m·s⁻¹ 的北风持续超过 9.6 h),可将污染物彻底清除。强度稍弱的冷空气可能使污染改善,而较弱的冷空气(北风风速较小,但有一定的降温 and 升压体现)可能在传输作用下使得污染物浓度不降反增。

关键词:天气分型,高低空配置,大气污染,冷空气

中图分类号: X16,P445

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.032401

Influence Mechanisms and Weather Patterns of Air Pollution Episodes in Jinan

JIANG Qi^{1,2} GUI Hailin¹ HUA Cong¹ ZHANG Bihui¹ XU Ran¹

HE Jiabao³ LYU Mengyao^{1,2}

1 National Meteorological Centre, Beijing 100081

2 Key Laboratory of Transportation Meteorology, CMA/Nanjing Joint Institute for Atmospheric Sciences, Nanjing 210041

3 Environment Monitoring Centre of Ningbo, Ningbo 315012

Abstract: In this paper, the correlation between air pollution and meteorological elements and the configuration of high- and low-altitude weather systems in Jinan City is discussed, a synoptic conceptual model of Jinan air pollution is formed, and the effects of cold air processes of different intensities on the generation and elimination of air pollutants in Jinan City are studied. The results show that during 2016—2018 more

^{*} 国家重点研发计划(2019YFC0214602)、国家自然科学基金项目(41875181)、中国气象局气象预报业务关键技术的发展专项[YBGJXM(2019)02-02]、国家气象中心预报员专项(CMAYBY2021-092)、南京气象科技创新研究院北极阁基金项目(BJG202106)和江苏省气象局北极阁开放研究基金项目(BJG201904)共同资助

2021 年 5 月 22 日收稿; 2022 年 5 月 18 日收修定稿

第一作者:江琪,主要从事大气环境预报和气溶胶研究. E-mail:Jiangqi89@163.com

通讯作者:桂海林,主要从事环境气象相关预报服务工作. E-mail:guihl@cma.gov.cn

than 75% of $\text{PM}_{2.5}$ pollution episodes in Jinan City occurred in the surface uniform pressure field. If the occurrence probability of each weather pattern was equal, the surface weather pattern with the highest occurrence probability of pollution episodes was the inverted trough pattern ($>55\%$), followed by the uniform pressure field pattern (26.8%). Moreover, there was a more than 25% occurrence probability of $\text{PM}_{2.5}$ pollution when the 500 hPa circulation was controlled by such weather systems, i. e., the ridge, straight westerlies, anticyclone, behind the trough and in front of the trough. The circulation configuration at upper and lower levels with the greatest probability of $\text{PM}_{2.5}$ pollution ($>50\%$) in Jinan City was the type of the surface inverted trough and behind the upper-level trough, followed by the type of the surface inverted trough and the upper-level straight westerlies, and the type of the surface uniform pressure field and behind the upper-level trough. For the average, the mixed layer height was below 1000 m during $\text{PM}_{2.5}$ pollution episodes and was less than 800 m under heavy pollution. During pollution periods, the average relative humidity is $65\% \pm 20\%$, and the average temperature was $6^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$. The effect of cold air with different intensities on the pollutant episodes was complex. The stronger cold air ($\Delta T_{24\text{h}} > 4.3^\circ\text{C}$, $\Delta p_{24\text{h}} > 4.74\text{ hPa}$) with a certain duration, such as the northerly wind greater than $3.5\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ lasting more than 9.6 h, can remove pollutants completely. The slightly weaker cold air may be beneficial to reduce pollutant concentration. However, the weak cold air with a lower northerly wind speed may instead increase the pollutant concentration due to the transport of pollutants.

Key words: weather classification, high- and low-altitude configuration, air pollution, cold air

引 言

2013 年以来,在《大气污染防治行动计划》等多种防治措施实施以来,我国的环境空气质量改善显著(Cai et al, 2017)。但工业化和城市化的高度集中和快速发展所造成的空气污染问题仍十分严峻(Miao and Liu, 2019; Wang Q Q et al, 2018),以细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)为首要污染物,多种大气污染高浓度并存的空气污染形势在我国中东部,特别是在包括山东、河南等地的京津冀及周边区域仍不容乐观(Wang L Q et al, 2018; 江琪等, 2018; 蒋璐君等, 2020)。高浓度的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染不仅对人体健康、环境和气候等多方面产生不利影响,也在很大程度上制约了经济的发展(Ding et al, 2012; Simon et al, 2020; 王继康等, 2021)。

不利气象条件的出现是污染排放稳定阶段重污染形成的必要外部条件(Liu et al, 2019; Miao et al, 2018; Wang J Z et al, 2018),其中,气象要素的变化可以解释污染物浓度逐日变化方差的 70% 以上(He et al, 2017)。研究多表明,适宜的气象条件,特别是在小风速形成的阻塞天气(苏兆达等, 2017),高湿状态下低层层结稳定,较强的辐射和下沉逆温(马小会等, 2017)以及地面辐合线(吕梦瑶等, 2019)存在的

大气环境中,可以快速形成以细颗粒物为典型特征的霾污染过程。局地气象条件的变化在很大程度上依赖于大尺度天气环流(马小会等, 2017)。Zhang et al(2019)指出,我国中东部不利气象条件发生时的高空环流通常为高压脊型、北脊南槽型和平直西风带型。孟燕军和程丛兰(2002)对北京地区天气形势与细颗粒物污染的研究认为,北京地区大气污染堆积容易发生在地面为低压类天气系统控制时。戴竹君等(2016)对江苏秋、冬季重度霾的形成机制进行探讨,将重度霾发生时的地面天气形势分为均压型、冷锋前部型和低压倒槽型 3 类。国内外相关的研究虽较多,但缺乏污染天气发生时高低空天气系统结合的研究。

由于我国幅员辽阔,各区域之间的污染特性差异显著。济南地形条件复杂,是京津冀及周边城市群重点控制区之一。在生态环境部发布的 2019 年全国 168 个重点城市排名中,济南位列倒数第 12 位,其大气污染形势仍相当严峻,对该区域污染的生消与大气环流、气象条件的研究意义重大。同时,冷空气对大气污染是一把“双刃剑”,可以使得大气污染显著改善,但也有可能将上游的污染物传输至下游,使得本地污染物浓度不降反增,因而,冷空气过程对污染物的影响,特别是较为复杂的弱冷空气的研究,是研究污染的生消和演变过程的难点

之一。本研究针对济南 2016—2018 年的大气污染与气象要素的相关关系进行探讨,并与污染发生时高空大气环流进行结合,形成济南大气污染的天气学概念模型,同时针对不同强度的冷空气过程研究其对济南市大气污染物的生消机制。

1 数据与方法

济南市(国控站点的平均值)PM_{2.5} 浓度数据来自全国城市空气质量实时发布平台(<http://106.37.208.233:20035/>),时间分辨率为 1 h。地面常规气象要素数据(主要包括风速、风向、湿度、气压等)和探空数据来自中国气象局的观测资料。采用罗氏法计算混合层高度,具体参照吕梦瑶等(2019)相关方法。

根据每日 08 时(北京时,下同)地面和高空 500 hPa 环流形势,将济南市的大气环流进行分类。地面天气形势共分为高压控制型、倒槽型、低压控制型和均压场 4 大类。其中,高压控制型可进一步分为高压底部、高压顶部、高压前部、高压后部和高压内 5 种;低压控制型可进一步分为低压底部、低压顶部、低压前部、低压后部和低压内 5 种。依据该地所处的象限进行划分,其中“前部”的象限分布为 45°~135°，“底部”的象限分布为 135°~225°，“后部”的象限分布为 225°~315°，“顶部”的象限分布为 0°~45°和 315°~360°。综上所述,地面气压场分为 4 大类和 12 小类。500 hPa 气压场共分为 8 类,分别为

反气旋型、副热带高压(以下简称副高)边缘型、副高内型、低涡型、平直西风带型、脊区控制型、槽后型和槽前型。

2 结果与讨论

2.1 2016—2018 年济南市空气质量整体概况

2016—2018 年,济南市平均 PM_{2.5} 质量浓度为 61.2 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。依据国家细颗粒物空气二级标准(PM_{2.5} 日平均质量浓度低于 75 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$),共有 27% 的时段为污染日(图 1a),秋、冬季中,PM_{2.5} 质量浓度(平均为 71.2 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)和污染日的比重明显上升,轻度及以上污染日的比重增大至 36%,其中,中度及以上污染(PM_{2.5} 日平均浓度高于 115 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)在污染日中的比重可达 54%(图 1b),大气污染形势仍旧严峻。但 2016—2018 年,济南市 PM_{2.5} 浓度呈逐年递减趋势,其中,2016 年 PM_{2.5} 质量浓度年均值为 74.1 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,2017 年较 2016 年降低 18%(60.7 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$),至 2018 年,年均 PM_{2.5} 质量浓度降低至 48.8 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,大气污染防治效果显著。各年份中 PM_{2.5} 日变化趋势整体相似,均呈现夜间高白天低,受交通高峰影响,PM_{2.5} 在 09 时和 20 时均有明显峰值出现。由于白天温度升高,PM_{2.5} 中大量挥发性颗粒物的损失造成 PM_{2.5} 日变化曲线中 16 时左右为一日中的最低值。

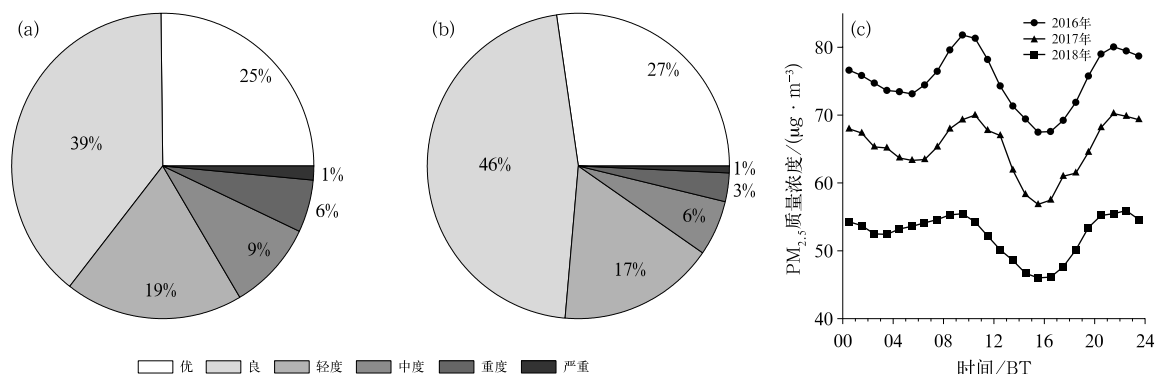


图 1 2016—2018 年(a)全年和(b)秋、冬季济南市空气质量频数,以及(c)PM_{2.5} 浓度逐年的日变化趋势

Fig. 1 The frequency of air quality during (a) annual and (b) autumn and winter as well as (c) daily variation of PM_{2.5} concentration yearly in Jinan from 2016 to 2018

2.2 不同环流类型出现污染的概率分析

图 2 给出了济南市全年地面和高空(500 hPa)不同环流形势下轻度、中度和重度及以上(重度和严重污染)PM_{2.5}污染出现的次数和频率,其中地面环流形势按照 12 小类进行统计。由图可见,济南市 75% 以上的 PM_{2.5} 污染日(轻度及以上)均出现在均压场控制的地面环流中,均压场是济南市形成重污染天气过程的最典型的地面天气形势之一。造成这

一现象的主要原因为济南地区受均压场控制的日数和频次(78%)均显著高于其他地面环流类型。其中,重度及以上大气污染中 73% 的概率也出现在地面均压场的控制下。受均压场控制时,整个大气的扩散条件较差,特别是在秋、冬季,大气处于静稳状态,地面以静小风为主,同时,混合层高度也通常较低,污染物在水平和垂直方向均不易扩散,使得污染物在近地层不断累积。除均压场外,污染天气还主要出现在高压底部、高压前部以及倒槽型的控制中。

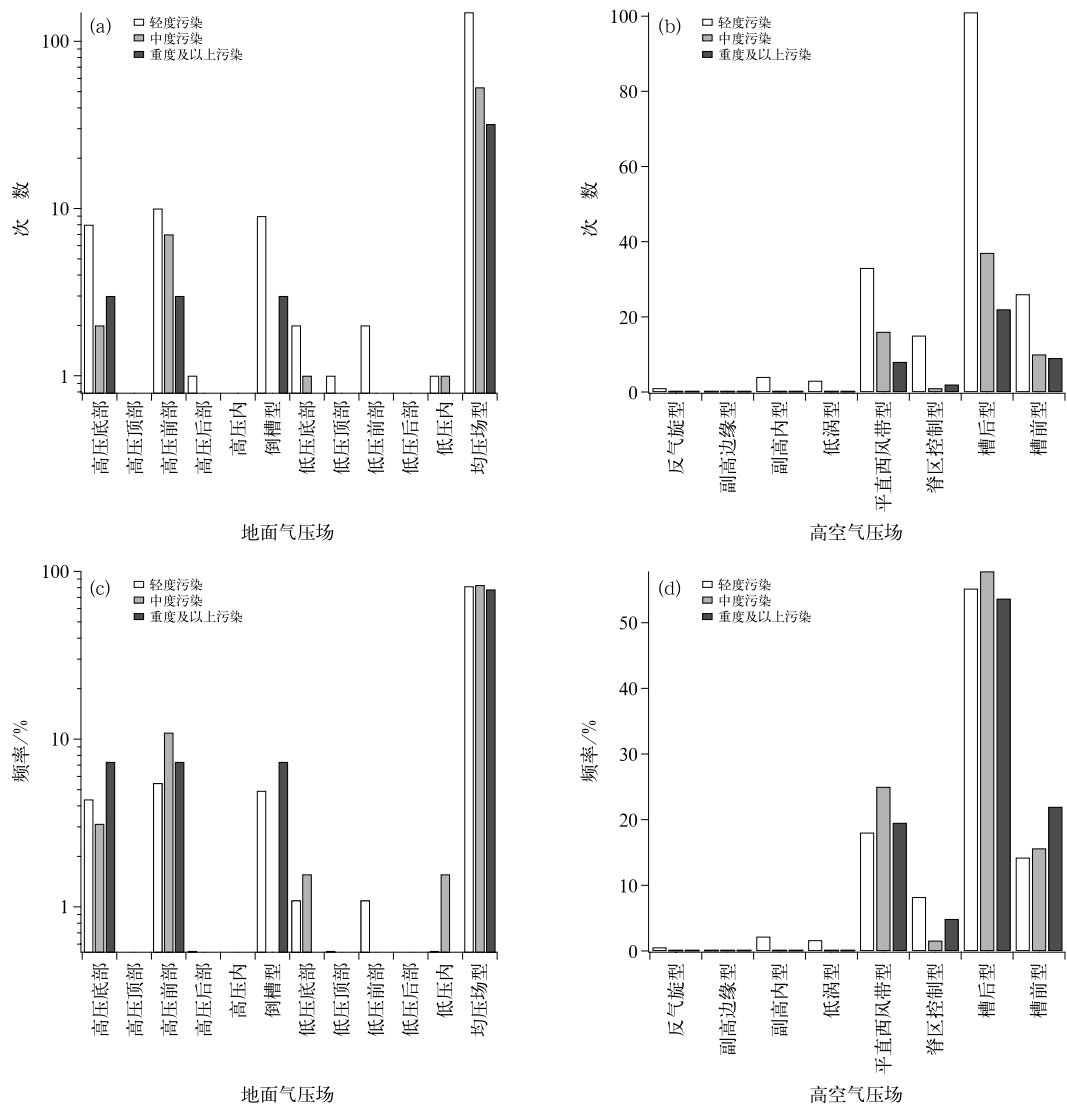


图 2 2016—2018 年济南市全年(a,c)地面和(b,d)500 hPa 高空不同环流形势下轻度、中度和重度及以上 PM_{2.5} 污染出现的(a,b)次数和(c,d)频率

(图 2a 和 2c 纵坐标采用对数坐标)

Fig. 2 The (a, b) number and (c, d) frequency of light, moderate, severe and above PM_{2.5} pollution under different (a, c) ground and (b, d) high-altitude circulation situations at 500 hPa in Jinan throughout the year from 2016 to 2018

(Logarithmic coordinates are used in Figs. 2a, 2c)

污染事件中,当济南地区转受高压底部控制时,通常为偏北方向的冷空气主体即将但还没抵达该地,此时,济南本地的大气扩散条件仍未有效改善,本地污染物不断累积,再加上上游输送而来的污染物与本地污染物累加,使得大气污染,特别是重污染天气出现的概率大大增加。与高压底部相似,处于高压前部时,济南地区处于偏西或西北方向冷空气的前沿,污染物在冷锋前汇聚,使得大气污染加重。受倒槽控制时,地面多处于弱低压辐合区,此时,污染物在辐合场的作用下易产生累积。

500 hPa 的高空环流场(图 2),济南市大气污染主要出现在 3 种高空环流控制之中,分别为平直西风带型、槽后型和槽前型 3 种,特别是槽后型,轻度、中度和重度以上污染出现的概率和次数均位列 3 种类型首位。2016—2018 年,济南市 50% 以上的重度及以上污染出现时高空 500 hPa 的环流为槽后型。除去这 3 种主要的污染天气发生的高空环流形势外,还有一小部分的污染出现在脊区控制型。

由于不同天气类型出现的频次不同,如济南地面受均压场控制的概率远高于其他几种天气类型,虽然均压场中对应了最多的污染日,但不能说明均压场较其他大气环流控制时更有利于大气污染的出现。为了探究地面和高空不同种类的天气系统控制下大气污染的发生发展情况,需针对特定天气系统内发生的污染进行统计,以排除自身出现频次对污染天数的干扰。图 3 给出了济南地面 12 小类和 4 大类天气系统以及 500 hPa 中 8 类天气系统控制

下的不同污染天气发生的概率以及该类型天气系统出现的次数。

在天气类型出现概率均等的前提下(即研究时段各天气类型出现次数没有差异的前提下,如按照 12 小类对地面天气系统进行划分时,研究时段中 12 种天气类型出现的概率均等),轻度及以上污染天出现概率最高的地面天气类型为倒槽型,污染概率高于 55%。其次为低压前部、高压底部和低压内。重度及以上的污染时,倒槽型仍为 12 小类地面天气系统中重度及以上污染出现概率最高的天气类型,其出现概率高达为 14%,其次为高压底部,出现概率为 6.7%。在地面 4 大类环流类型分类中,PM_{2.5} 污染,特别是重度及以上污染出现概率最高的地面天气类型仍为倒槽型(57%),其中重度污染占总污染概率的 25%。其次是均压场型,污染概率为 26.8%。

在高空环流中,500 hPa 为脊区控制型、平直西风带型、反气旋型、槽后型和槽前型控制时,均有较大概率(> 25%)的 PM_{2.5} 污染出现,但反气旋在 2016—2018 年共 3 年的统计结果中仅有不到 5 次的统计结果,数据较少,缺乏统计意义,其结果有待进一步考究。脊区控制型、平直西风带型、槽后型和槽前型 4 种天气系统在研究期间均有较高频次的出现,其中污染出现概率最高的环流类型为脊区控制型。其他高空环流类型中,PM_{2.5} 污染出现的概率相对降低(< 10%)。对于重度及以上污染较为严重的污染日,高空为槽前控制时,其出现的概率最大,达 5.3%,其次为平直西风带型,为 4.4%。

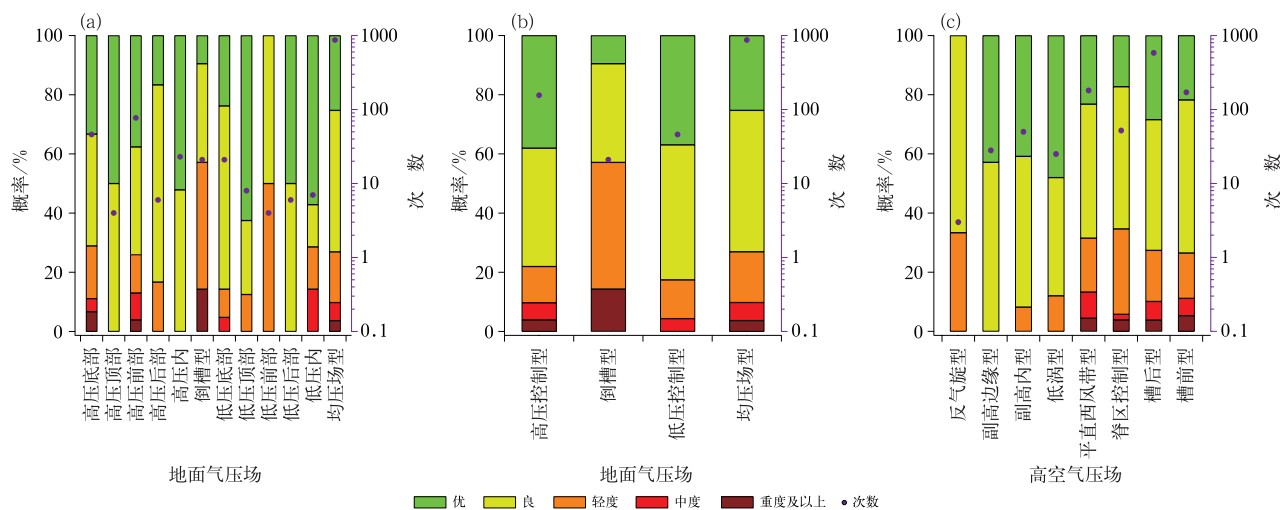


图 3 2016—2018 年济南市全年地面(a)12 小类和(b)4 大类以及(c)高空 8 类天气系统控制下,不同空气质量发生的概率和该类型天气系统出现的次数

Fig. 3 The occurrence probability of different air quality under the control of (a) 12 sub-category and (b) 4 major types of surface weather systems as well as (c) 8 types of upper-level weather systems throughout the year and the occurrence number of these weather system patterns in Jinan from 2016 to 2018

高低空环流总是在相互配合的作用下推动大气的运动(李崇银等, 2019)。探究高低空环流配合作用下如何作用于大气污染的生消, 对大气污染的监测、预报和预警有着重要的意义和价值。对济南市高空 8 种环流与地面 12 小类(图 4a~4c)和地面 4 大类(图 4d~4f)不同组合配置下轻度及以上污染、中度及以上污染和重度及以上污染出现的概率分别进行统计, 空白区域表示统计时段内无此类天气配置出现, 或此类高低空配置样本量过少(低于 5 次)。

由图 4 可见, 济南市出现轻度及以上污染概率最大的高低空形势(地面 4 大类划分)为地面倒槽型配合高空槽后型, 出现污染的概率高于 50%, 其次为倒槽型配合平直西风带型以及低压控制型配合平直西风带型(45%~50%)。地面均压场配合高空脊

区控制型也有约 40% 的污染概率出现。具体到地面 12 小类的划分中, 污染出现概率最高仍为高空槽后配合地面倒槽型, 其次为地面倒槽配合平直西风带型, 高压前部与平直西风带型配合。倒槽型与槽前型配合的天气形势也较易发生轻度及以上污染天气。中度及以上污染发生的概率较轻度及以上污染概率显著下降, 其中地面倒槽控制, 高空槽前型的环流配置发生中度及以上污染的概率最高(约 34%)。细化地面环流形势后, 地面倒槽型和高空槽前型, 地面低压底部与高空平直西风带型的配置对中度及以上污染的发生最为有利。对于重度及以上污染, 仍为地面倒槽型与高空槽前型配合时的污染概率最大。

综上所述, 根据 $PM_{2.5}$ 污染的出现概率, 共归纳

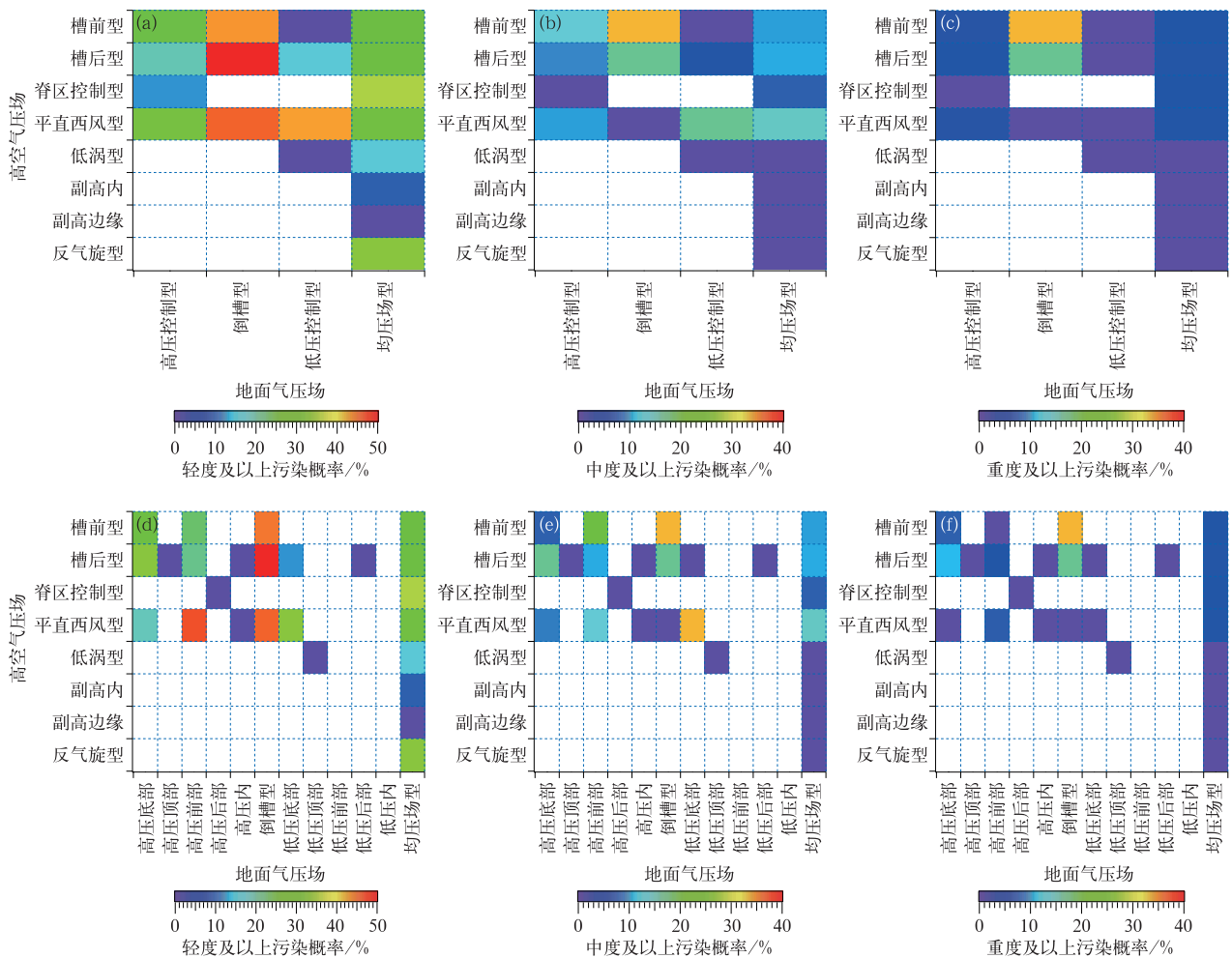


图 4 2016—2018 年济南市高空 8 种环流与地面(a~c)4 大类和(d~f)12 小类环流场不同组合配置下(a,d)轻度及以上,(b,e)中度及以上和(c,f)重度及以上污染出现的概率

Fig. 4 The probability of (a, d) light and above, (b, e) moderate and above, (c, f) severe and above pollution under different combinations of the 8 types of circulation at high altitude cooperate with (a—c) 4 major types and (d—f) 12 sub-category circulation on the ground of Jinan from 2016 to 2018

总结出 6 种与济南市 $\text{PM}_{2.5}$ 污染最为相关的高低空大气环流配置。分别为:地面倒槽配合高空槽后型(此类天气系统出现大气污染的概率最高);地面倒槽配合高空槽前型(此类天气系统出现污染的概率较高,且一旦出现污染,则中度甚至重度以上污染出现的概率极大);地面倒槽配合高空平直西风带型(此类天气系统出现污染概率较高,但以轻度污染为主);地面高压前部配合高空平直西风带型(此类天气系统出现污染概率较高,且有一定概率出现中度和重度及以上污染);地面低压控制(特别是低压底部时)配合高空平直西风带型(此类天气系统易出现轻度至中度污染,重度及以上污染出现概率不高);地面均压场配合高空脊区控制型(此类天气系统配置较为常见,其出现轻度污染的概率较高)。

2.3 大气污染与气象要素的相关性探讨

在污染源相对稳定的状态下,气象条件是影响

城市大气污染的主要因素。气象条件对大气污染物所产生的影响主要表现为大气对污染物的稀释扩散能力、对大气污染物的物理化学转化过程以及大气状况对污染源本身的影响(Han et al, 2015; Sun et al, 2016)。本节将对有关气象要素,包括温度(T)、湿度(RH)、气压(p)、风速(V)和边界层高度(MLH)等,与 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的相关关系进行分析。

全年情况下,济南市 $\text{PM}_{2.5}$ 分布区间中(图 5a, 每间隔 $12 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 进行统计), $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度出现频率最高的区间为 $24 \sim 48 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 高于 $50 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 后,随着浓度的增大,出现的频率逐步降低。图 5b 中,随着 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的增大,混合层高度呈下降趋势,平均情况下,轻度及以上污染出现时的 MLH 低于 1000 m , 重度及以上污染时 MLH 的平均值小于 800 m 。达到轻度污染前,随着 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的增加,气压值先有所降低后逐步升高,而污染过程中,随着污染物的累积,气压逐步增高($1018 \sim 1022 \text{ hPa}$),

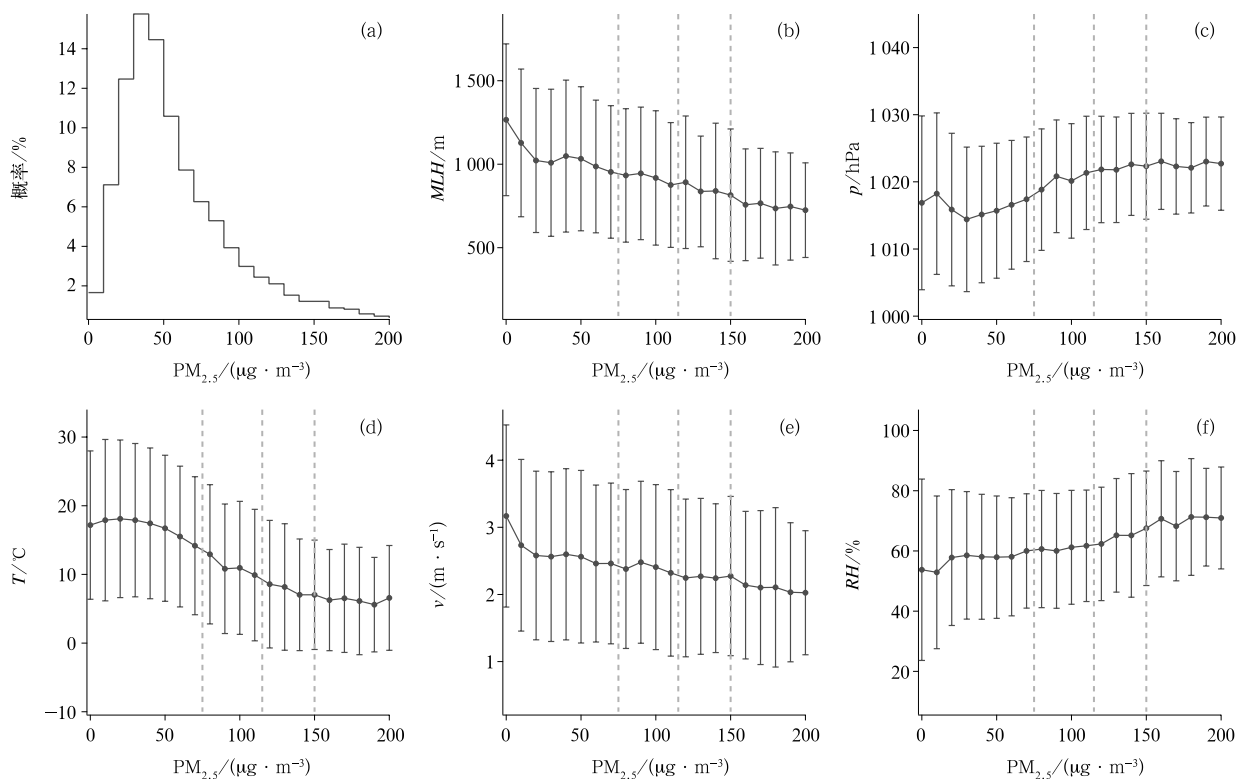


图 5 2016—2018 年济南市 (a) $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度概率分布, 以及 (b) 混合层高度、(c) 气压、(d) 温度、(e) 风速和 (f) 湿度随 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度增加的统计值变化趋势
(图 5b~5f 中, 虚线从左到右分别为轻度、中度和重度污染分割线)

Fig. 5 (a) The probability distribution of $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration and the statistical of (b) the height of the mixed layer, (c) pressure, (d) temperature, (e) wind speed and (f) humidity with $\text{PM}_{2.5}$ mass loading in Jinan from 2016 to 2018

(In Figs. 5b—5f, the dotted lines are the dividing lines of light, moderate and heavy pollutions from left to right, respectively)

而达到重度污染后,气压的均值变化不大(1022 hPa \pm 1 hPa)。PM_{2.5}和温度整体呈反相关趋势,轻度至重度污染区间,随着 PM_{2.5}质量浓度升高,温度降低显著,下降率可达 $0.09^{\circ}\text{C} \cdot \mu\text{g}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ 。重度及以上污染时,温度的均值基本维持在 $6^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 。风速和 PM_{2.5}质量浓度呈一定负相关趋势,PM_{2.5}污染出现时的平均风速在 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右。湿度方面,随着 PM_{2.5}质量浓度的增大,湿度逐步增大,污染时段相对湿度的均值主要分布在 $65\% \pm 20\%$ 。

2.4 冷空气对污染物的清除机制

冷空气往往是一次污染天气过程中重要的转折性指标,但每一次冷空气的强弱、路径各有差异,其对污染物浓度的影响也较为复杂。冷空气可能使得污染物得到有效清除或仅起到一定的改善作用,甚至在较弱冷空气时污染物浓度可能受上游传输影响不降反增,这也是大气污染预报中的难点之一。本节将对 2016—2018 年影响济南市的冷空气对污染物的清除和输送机制进行分析,以期为大气污染预报,特别是弱冷空气下污染物的生消提供预报指标。

影响济南市的冷空气通常为冷性高压的东移南下,常伴随着正变压、负变温以及偏北风增大等特征。对 24 h 的 PM_{2.5}浓度变化值($\Delta\text{PM}_{2.5}$)与 24 h 负变温($\Delta T_{24\text{h}}$)以及 24 h 正变压($\Delta p_{24\text{h}}$)的相关关系进行分析。如图 6 所示,负变温和 $\Delta\text{PM}_{2.5}$ 表现为一定的正相关趋势($R=0.40$),正变压则与 $\Delta\text{PM}_{2.5}$ 呈负相关关系($R=-0.46$)。对统计的数值依据前一日的 PM_{2.5}质量浓度进行颜色划分后可以看到,对相关影响较大的离散点主要为前一日的 PM_{2.5}质量浓度达重度及以上(图 6 中红点),且第二日 PM_{2.5}质量浓度较前一日下降超过 $100 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,其变压区间主要分布于 $2 \sim 7 \text{ hPa}$,而降温的区间则主要落在 $-6 \sim -1^{\circ}\text{C}$ 范围内。

由于冷空气的强弱对大气污染的影响作用不同,需对污染在不同强度冷空气作用下所受的影响开展分析。去掉污染时段后(PM_{2.5}浓度超过 $75 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$),得到济南市清洁条件下 PM_{2.5}质量浓度均值($C_{\text{PM}_{2.5}}=40.1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$),以此作为大气清洁时的背景浓度。将北风的风向依据象限进行划分,其中, $0^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 和 $330^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 定义为北风, $30^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 定义为东北风, $270^{\circ} \sim 330^{\circ}$ 定义为西北风,用于区分冷空气的路径。共分为以下 5 种情况探讨冷空气($\Delta T_{24\text{h}} < 0^{\circ}\text{C}$ 且 $\Delta p_{24\text{h}} > 0 \text{ hPa}$)对济南市大气污染的生消机制:类型 1 为污染完全清除型,表现为冷空

气作用的前一日出现轻度及以上污染(PM_{2.5}质量浓度日均值超过 $75 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$),冷空气影响下的第二日 PM_{2.5}质量浓度下降至低于 $C_{\text{PM}_{2.5}}$;类型 2 为冷空气作用下污染改善型,表现为冷空气作用的前一日出现轻度及以上污染,冷空气影响下的第二日 PM_{2.5}质量浓度下降至 $75 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 以下,但仍高于 $C_{\text{PM}_{2.5}}$,且下降幅度超过 $20 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$;类型 3 为污染缓解型,表现为冷空气作用的前一日出现轻度及以上污染,冷空气影响下的第二日 PM_{2.5}质量浓度降幅超过 $20 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,但日均值仍高于 $75 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$;类型 4 为污染浓度变化不大型,表现为冷空气作用的前一日出现轻度及以上污染,冷空气影响下的第二日 PM_{2.5}质量浓度增加和减少的幅度均在 $20 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 内;类型 5 为污染增长型,表现为冷空气作用的前一日出现轻度及以上污染,冷空气影响下的第二日 PM_{2.5}质量浓度不降反增,增加幅度超过 $20 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。对此五种类型条件下, $\Delta\text{PM}_{2.5}$ 、各冷空气指标($\Delta T_{24\text{h}}$ 、 $\Delta p_{24\text{h}}$ 、偏北风的平均风速和风向)以及该类型出现的次数进行统计,结果见表 1 和表 2。

类型 1 时,济南的 $\Delta\text{PM}_{2.5}$ 的均值绝对值在 5 种类型中最高,达 $71.49 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,但 PM_{2.5}质量浓度下降的区间分布较广,最高可降低 $207 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。 $\Delta T_{24\text{h}}$ 平均和最大值、 $\Delta p_{24\text{h}}$ 、偏北风的平均风速和持续时间均在 5 种类型中最高, $\Delta T_{24\text{h}}$ 和 $\Delta p_{24\text{h}}$ 平均值分别为 -4.33°C 和 4.74 hPa ,其偏北风的平均风速和持续时间也分别达到 $3.45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 9.55 h 。类型 1 在统计时段共发生了 21 次,其中冷空气来向以东北方向为主(约 67%)。因而,在污染条件下,较强的冷空气(通常 $\Delta T_{24\text{h}}$ 的绝对值高于 4.3°C , $\Delta p_{24\text{h}}$ 高于 4.74 hPa),且持续一定的时长(通常 $3.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上的北风持续 9.6 h 以上)后,才能将污染物彻底清除至 $C_{\text{PM}_{2.5}}$ 以下。

类型 2 时,污染物浓度较前一日明显的改善,但仍高于 $C_{\text{PM}_{2.5}}$,依然有部分污染物没有被清除干净。对类型 2 进行统计,PM_{2.5}质量浓度下降的均值仅次于类型 1, $\Delta\text{PM}_{2.5}$ 均值绝对值为 $59.14 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。类型 2 中, $\Delta T_{24\text{h}}$ 的均值不高(略低于类型 3, $\Delta T_{24\text{h}}$ 均值为 -3.49°C),明显弱于类型 1,但 $\Delta T_{24\text{h}}$ 的波动范围较广($-12.82 \sim -0.08^{\circ}\text{C}$); $\Delta p_{24\text{h}}$ 在 5 种类型中仅次于类型 1,平均值为 4.27 hPa 。此类型中,偏北风的平均时长较长,达 9.47 h 。与类型 1 类似,类型 2 中冷空气风仍以东北方向为主,其次为西北方向,正北方向较少。综上所述,类型 2 时,污染物浓

度在冷空气作用下降低至轻度以下, $C_{PM_{2.5}}$ 以上, 其对冷空气的要求明显低于类型 1, $\Delta T_{24\text{ h}}$ 为负值, $\Delta P_{24\text{ h}}$ 在 4.27 hPa 左右, $2.65\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上的偏北风持续时长在 9.5 h 左右, 可达到类型 2 中对污染物的减缓作用。

类型 3 与类型 2 相似, 冷空气作用下, 第二日较前一日的 $PM_{2.5}$ 浓度下降幅度均超过 $20\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 但类型 3 中, 冷空气作用下 $PM_{2.5}$ 质量浓度仍高于轻度污染。类型 3 中, $\Delta T_{24\text{ h}}$ 平均值略高于类型 2, 但明显低于类型 1, $\Delta p_{24\text{ h}}$ 均值为 3.59 hPa, 显著低于类型 1 和类型 2。类型 3 中, 北风的平均风速较类型 1 和类型 2 也明显降低, 平均风速仅为 $2.24\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 但北风的平均时长仍高于 9 h。因而, 北风的风速值起到了重要的影响作用, 在北风风速较小时, 即便其持续时间较长, 大气中的污染物仍不能得到有效的清除。

类型 4 中, 冷空气的各项指标较类型 1~类型 3 均明显降低 ($\Delta T_{24\text{ h}}$ 均值为 $-2.55\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta p_{24\text{ h}}$ 均值为 2.67 hPa), 特别是北风的平均时长仅为 5.94 h, 此种类型下, 通常为弱冷空气活动, 污染物浓度较前一日变化不大, $\Delta PM_{2.5}$ 的变化区间为 $-20\sim 16\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

类型 5 为污染物浓度明显的升高型 ($\Delta PM_{2.5}$ 变化区间为 $20\sim 168\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 这种类型在所有类型中出现的次数最多。类型 5 中, 北风风速均值较小 ($2.06\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), 持续时间平均为 5.53 h, 但冷空气作用下仍有一定的降温和升压的体现 ($\Delta T_{24\text{ h}}$ 均值为 $-2.49\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta p_{24\text{ h}}$ 均值为 2.30 hPa) 此时, 在弱冷空气和大气温度降低的共同作用下, 一方面, 可能在上游污染物的传输作用下使得污染物浓度得到一定的累积; 另一方面, 温度降低后大气的静稳形势可能进一步建立, 使得污染物浓度不降反增。

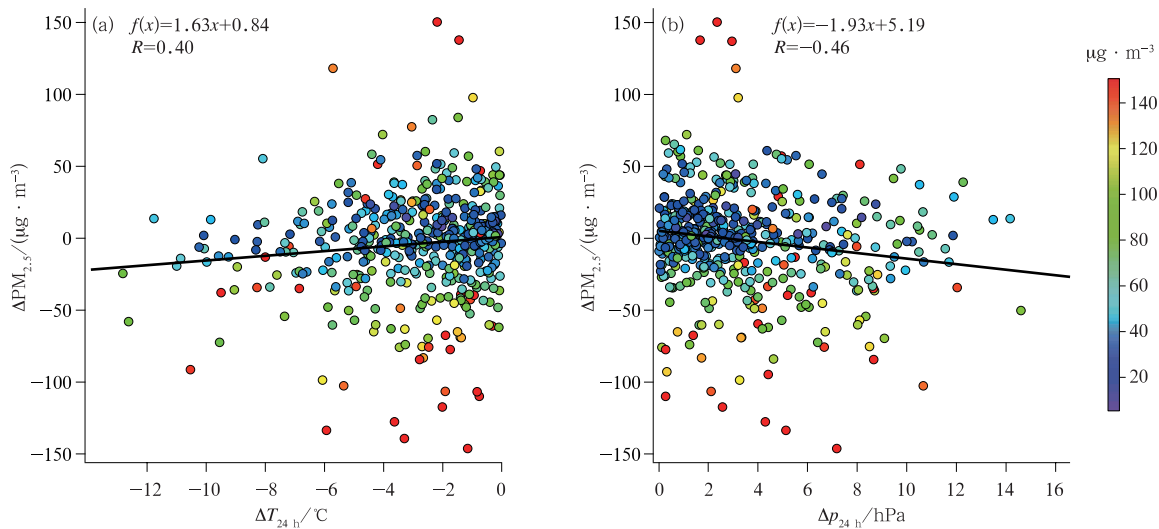


图 6 2016—2018 年济南市 (a) $\Delta T_{24\text{ h}}$ 和 $\Delta PM_{2.5}$, (b) $\Delta p_{24\text{ h}}$ 和 $\Delta PM_{2.5}$ 的相关关系

(彩色圆点为温度或气压发生变化的前一日的 $PM_{2.5}$ 日均浓度)

Fig. 6 The correlations between (a) $\Delta T_{24\text{ h}}$ and $\Delta PM_{2.5}$ and (b) $\Delta p_{24\text{ h}}$ and $\Delta PM_{2.5}$ in Jinan from 2016 to 2018

(Color dot is the daily average concentration of $PM_{2.5}$ on the day before the temperature or air pressure changes)

表 1 2016—2018 年济南市 5 种类型条件下各冷空气指标和 $\Delta PM_{2.5}$ (依据 20 时的 24 h 变温、变压计算)

Table 1 Statistical values of changes in various cold air indicators and $\Delta PM_{2.5}$ under 5 types of conditions in Jinan from 2016 to 2018 (calculated by $\Delta T_{24\text{ h}}$ and $\Delta p_{24\text{ h}}$ at 20 BT)							
污染变化 机制	$\Delta PM_{2.5}$ 均值 / $(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	$\Delta PM_{2.5}$ 区间 / $(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	$\Delta T_{24\text{ h}}$ 平均 / $^{\circ}\text{C}$	$\Delta T_{24\text{ h}}$ 最大 / $^{\circ}\text{C}$	$\Delta T_{24\text{ h}}$ 最低 / $^{\circ}\text{C}$	$\Delta p_{24\text{ h}}$ 变压 /hPa	出现次数 /次
类型 1	-71.49	-207~-36	-4.33	-14.03	-0.11	4.74	21
类型 2	-59.14	-146~-23	-3.49	-12.82	-0.08	4.27	30
类型 3	-50.81	-117~-23	-3.57	-9.50	-0.33	3.59	20
类型 4	0.72	-20~16	-2.55	-8.95	-0.10	2.67	29
类型 5	56.11	20~168	-2.49	-6.33	-0.08	2.30	33

表 2 同表 1, 但为下风向、风速

Table 2 Same as Table 1, but for downwind wind speed and direction

污染变化机制	北风平均风速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	北风平均时长 /h	正北方向/次	东北方向/次	西北方向/次
类型 1	3.45	9.55	1	14	6
类型 2	2.65	9.47	2	19	9
类型 3	2.24	9.15	1	14	5
类型 4	2.11	5.94	2	19	8
类型 5	2.06	5.53	2	18	13

3 结 论

(1) 2016—2018 年, 济南市 75% 以上的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染日出现在均压场控制的地面环流中。500 hPa 的高空环流场中大气污染主要出现在平直西风带型、槽后型和槽前型中。在天气类型出现概率均等的前提下, 轻度及以上污染日出现概率最高的地面天气类型为倒槽型, 污染概率 > 55%。其次是均压场型, 污染概率为 26.8%。在高空环流中, 500 hPa 为脊区控制型、平直西风带型、反气旋型、槽后型和槽前型控制时, 均有 > 25% 的概率出现 $\text{PM}_{2.5}$ 污染。

(2) 济南市出现轻度及以上污染概率最大的高低空形势为地面倒槽型配合高空槽后型, 出现污染的概率 > 50%, 其次为倒槽型配合平直西风带型以及均压场配合槽后型。地面均压场配合高空脊区控制型也有约 40% 的污染概率出现。

(3) 平均情况下, 轻度及以上污染出现时 MLH 低于 1000 m。重度及以上污染时, MLH 的平均值小于 800 m。温度的均值基本维持在 $6^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 。随着 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的增大, 湿度逐步增大, 污染时段相对湿度的均值主要分布在 $65\% \pm 20\%$ 。

(4) 不同强度冷空气对污染物表现出显著不同的作用, 较强的冷空气 ($\Delta T_{24\text{h}} > 4.3^\circ\text{C}$, $\Delta p_{24\text{h}} > 4.74\text{ hPa}$), 且持续一定的时长 ($> 3.5\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的北风持续 9.6 h 以上), 可将污染物彻底清除。强度稍弱的冷空气可能使大气改善或减缓, 而较弱的冷空气 (北风风速均值较小, 仅为 $2.06\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 但仍有一定的降温和升压的体现) 可能在传输作用下使得污染物浓度不降反增。

参考文献

戴竹君, 刘端阳, 王宏斌, 等, 2016. 江苏秋冬季重度霾的分型研究 [J]. 气象学报, 74(1): 133-148. Dai Z J, Liu D Y, Wang H B,

et al, 2016. The classification study of the heavy haze during autumn and winter of Jiangsu [J]. Acta Meteor Sin, 74(1): 133-148 (in Chinese).

江琪, 王飞, 孙业乐, 2018. 河北香河亚微米气溶胶组分特性、来源及其演变规律分析 [J]. 环境科学, 39(7): 3022-3032. Jiang Q, Wang F, Sun Y L, 2018. Analysis of chemical composition, source and evolution of submicron particles in Xianghe, Hebei Province [J]. Environ Sci, 39(7): 3022-3032 (in Chinese).

蒋璐君, 刘熙明, 张弛, 2020. 江西省近 50 年霾天气时空分布特征及成因分析 [J]. 气象, 46(5): 695-704. Jiang L J, Liu X M, Zhang C, 2020. Spatio-temporal characteristics of haze and its forming reason in Jiangxi Province during the past 50 years [J]. Meteor Mon, 46(5): 695-704 (in Chinese).

李崇银, 杨辉, 赵晶晶, 2019. 大气环流系统组合性异常与极端天气气候事件发生 [J]. 大气科学学报, 42(3): 321-333. Li C Y, Yang H, Zhao J J, 2019. Combinational anomalies of atmospheric circulation system and occurrences of extreme weather/climate events [J]. Trans Atmos Sci, 42(3): 321-333 (in Chinese).

吕梦瑶, 张恒德, 王继康, 等, 2019. 2015 年冬季京津冀两次重污染天气过程气象成因 [J]. 中国环境科学, 39(7): 2748-2757. Lü M Y, Zhang H D, Wang J K, et al, 2019. Analysis of meteorological causes of two heavily polluted weather processes in Beijing-Tianjin-Hebei Region in winter of 2015 [J]. China Environ Sci, 39(7): 2748-2757 (in Chinese).

马小会, 廖晓农, 唐宜西, 等, 2017. 北京地区重空气污染天气分型及个例分析 [J]. 气象与环境学报, 33(5): 53-60. Ma X H, Liao X N, Tang Y X, et al, 2017. Weather pattern and case analysis of air heavy pollution days in Beijing [J]. J Meteor Environ, 33(5): 53-60 (in Chinese).

孟燕军, 程丛兰, 2002. 影响北京大气污染物变化的地面天气形势分析 [J]. 气象, 28(4): 42-47. Meng Y J, Cheng C L, 2002. Impact of surface synoptic situations on air pollution in Beijing Area [J]. Meteor Mon, 28(4): 42-47 (in Chinese).

苏兆达, 白龙, 梁岱云, 2017. 近 15 年南宁市霾日数变化特征及气象成因分析 [J]. 高原气象, 36(3): 826-834. Su Z D, Bai L, Liang D Y, 2017. Variations of haze days and its meteorological causes in Nanning during 2000 to 2014 [J]. Plateau Meteor, 36(3): 826-834 (in Chinese).

王继康, 江琪, 尤媛, 等, 2021. 东南亚生物质燃烧对我国霾和降水的影响 [J]. 气象, 47(3): 348-358. Wang J K, Jiang Q, You Y, et al, 2021. Effects of biomass burning aerosol in Southeast Asia on

- haze and precipitation over China[J]. Meteor Mon, 47(3):348-358(in Chinese).
- Cai S Y, Wang Y J, Zhao B, et al, 2017. The impact of the “Air Pollution Prevention and Control Action Plan” on $PM_{2.5}$ concentrations in Jing-Jin-Ji Region during 2012–2020[J]. Sci Total Environ, 580:197-209.
- Ding G D, Wang P, Tian Y, et al, 2012. Organophosphate pesticide exposure and neurodevelopment in young Shanghai children[J]. Environ Sci Technol, 46(5):2911-2917.
- Han T T, Xu W Q, Chen C, et al, 2015. Chemical apportionment of aerosol optical properties during the Asia-Pacific Economic Cooperation summit in Beijing, China[J]. J Geophys Res: Atmos, 120(23):12281-12295.
- He J J, Gong S L, Yu Y, et al, 2017. Air pollution characteristics and their relation to meteorological conditions during 2014–2015 in major Chinese cities[J]. Environ Pollut, 223:484-496.
- Liu L K, Zhang X Y, Zhong J T, et al, 2019. The ‘two-way feedback mechanism’ between unfavorable meteorological conditions and cumulative $PM_{2.5}$ mass existing in polluted areas south of Beijing[J]. Atmos Environ, 208:1-9.
- Miao Y C, Guo J P, Liu S H, et al, 2018. Impacts of synoptic condition and planetary boundary layer structure on the trans-boundary aerosol transport from Beijing-Tianjin-Hebei Region to Northeast China[J]. Atmos Environ, 181:1-11.
- Miao Y C, Liu S H, 2019. Linkages between aerosol pollution and planetary boundary layer structure in China[J]. Sci Total Environ, 650:288-296.
- Simon M C, Naumova E N, Levy J I, et al, 2020. Ultrafine particle number concentration model for estimating retrospective and prospective long-term ambient exposures in urban neighborhoods[J]. Environ Sci Technol, 54(3):1677-1686.
- Sun Y L, Du W, Fu P Q, et al, 2016. Primary and secondary aerosols in Beijing in winter: sources, variations and processes[J]. Atmos Chem Phys, 16(13):8309-8329.
- Wang J Z, Zhang X Y, Li D, et al, 2018. Interdecadal changes of summer aerosol pollution in the Yangtze River Basin of China, the relative influence of meteorological conditions and the relation to climate change[J]. Sci Total Environ, 630:46-52.
- Wang L Q, Li P F, Yu S C, et al, 2018. Predicted impact of thermal power generation emission control measures in the Beijing-Tianjin-Hebei Region on air pollution over Beijing, China[J]. Sci Rep, 8(1):934.
- Wang Q Q, Sun Y L, Xu W Q, et al, 2018. Vertically resolved characteristics of air pollution during two severe winter haze episodes in urban Beijing, China[J]. Atmos Chem Phys, 18(4):2495-2509.
- Zhang X Y, Xu X D, Ding Y H, et al, 2019. The impact of meteorological changes from 2013 to 2017 on $PM_{2.5}$ mass reduction in key regions in China[J]. Sci China Earth Sci, 62(12):1885-1902.

(本文责编:何晓欢)